

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Siniša Terbovc

Zagreb, 2012.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada:

Doc. dr.sc. Lovorka Grgec-Bermanec

Siniša Terbovc

Zagreb, 2012.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentorici Doc. Dr. sc. Lovorki Grgec Bermanec na idejnom predlošku, smjernicama i sugestijama u realizaciji ovog rada.

Siniša Terbovc

Sadržaj

Popis slika	I
Popis dijagrama.....	II
Popis oznaka	III
1. Sažetak	1
2. Uvod.....	2
3. Pregled metoda za mjerenje malih tlakova [1]	3
3.1 Općenito o tlaku	3
3.2 Metode za mjerenje malih tlakova	6
3.2.1 Cjevni manometri.....	6
3.2.2 Tlačna zvana	11
3.2.3 Pretvornici tlaka [3]	12
3.2.4 Manometarske kapljevine	13
4. Pregled metoda za umjeravanje i ispitivanje	15
4.1 EURAMET/cg-17/v.01 Upute za umjeravanje elektromehaničkih manometara [2]	17
4.1.1 Postupak umjeravanja u laboratoriju	18
4.1.2 Određivanje mjerne nesigurnosti	19
4.2 DKD-R 6-1 Priručnik za umjeravanje manometara [3]	19
5. Opis zadatka i uvod u zadanu problematiku	20
6. Ponuđeno rješenje za zadani problem.....	21
7. Proračun zvonastog manometra.....	22
8. Konstrukcija zvona	27
9. Fizička izvedba zvona.....	30
10. Određivanje karakteristika zvonastog manometra.....	36
10.1 Ispitivanje mjernog područja zvonastog manometra.....	36
10.2 Ispitivanje stabilnosti radnih točaka zvonastog manometra	39
10.3 Korištena oprema:.....	40
11. Zaključak.....	46
12. Literatura:.....	47

Popis slika

- Slika 2.1. Grafički prikaz odnosa sile i tlaka
Slika 3.1. Ovisnost tlaka o težini zamišljenog stupca fluida [7]
Slika 3.2. Odnos tlakova
Slika 3.3. U-manometar
Slika 3.4. U-manometar nesimetrične izvedbe
Slika 3.5. Manometar s čašicom
Slika 3.6. Manometar s priklonjenom cijevi
Slika 3.7. Minimetar
Slika 3.8. Zvonasti manometar [2]
Slika 4.1. Prikaz rasta nesigurnosti niz lanac sljedivosti
Slika 4.2. Regionalne mjeriteljske organizacije diljem svijeta
Slika 7.1. Shema rada zvonastog manometra
Slika 7.2. Shema zadatka
Slika 8.1. Shema tlačnog mehanizma za generiranje malih tlakova
Slika 8.2. Shema mjernog mehanizma
Slika 9.1. Sklopljeni zvonasti manometar
Slika 9.2. Pogled na zvonasti manometar
Slika 9.3. Izrada zvona
Slika 9.4. Zavarivanje TIG postupkom
Slika 9.5. Izrada zvona
Slika 9.6. Izrada zvona
Slika 9.7. Izometrijski pogled na zvonasti manometar
Slika 10.1. PC M Kalibrator (Z-01196)
Slika 10.2. Određivanje minimalne točke mjernog područja zvonastog manometra
Slika 10.3. Pretlak u zvonastom manometru uslijed njegove težine
Slika 10.4. Određivanje maksimalne točke mjernog područja zvonastog manometra
Slika 10.5. Maksimalni postignut pretlak u zvonastom manometru
Slika 10.6. Keithley 2010 multimetar
Slika 10.7. GE Druck LPX 9381 precizni pretvornik tlaka
Slika 10.8. Ampermetar/Voltmetar
Slika 10.9. Ispitivanje stabilnosti radnih točaka zvonastog manometra
Slika 10.10. Računalni kod u programu Matlab

Popis dijagrama

Dijagram 10.1. Odnos struje i tlaka u pretvorniku tlaka

Dijagram 10.2. Prvo ispitivanje stabilnosti

Dijagram 10.3. Drugo ispitivanje stabilnosti

Popis oznaka

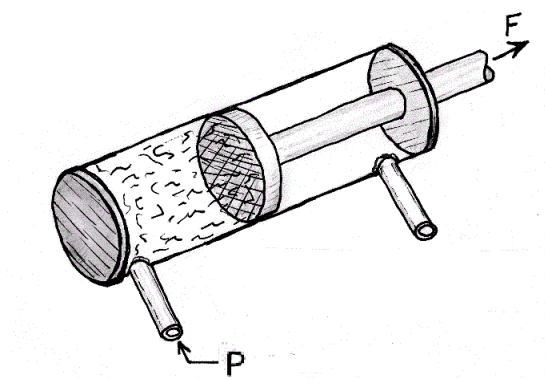
ρ	-gustoća	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
ρ_w	-gustoća vode	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
$\rho_{\text{č}}$	-gustoća čelika	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
F_h	-sila	$[\text{N}]$
F_1	-sila	$[\text{N}]$
m	-masa	$[\text{kg}]$
g	-zemljina akceleracija	$[\text{m}/\text{s}^2]$
U	-sila uzgona	$[\text{m}]$
ΔH_2	-razlika visina	$[\text{m}]$
H	-visina	$[\text{m}]$
h	-visina	$[\text{m}]$
D	-vanjski promjer zvona	$[\text{m}]$
d	-unutarnji promjer zvona	$[\text{m}]$
x	-visina vode unutar zvona	$[\text{m}]$
y	-dubina potonuća zvona	$[\text{m}]$
p_1	-tlak unutar zvona	$[\text{Pa}]$
p_a	-atmosferski tlak	$[\text{Pa}]$
p_o	-apsolutni tlak	$[\text{Pa}]$
p_{uk}	-apsolutni tlak	$[\text{Pa}]$
p_{pr}	-pretlak	$[\text{Pa}]$
h_n	-visina kapljevine za normalnu gravitaciju	$[\text{m}]$
h_{iz}	-izmjerena visina kapljevine	$[\text{m}]$
g_n	-normalna gravitacija (9.81 ms^{-2})	$[\text{m}/\text{s}^2]$
g_{iz}	-točna gravitacija na mjestu mjerenja	$[\text{m}/\text{s}^2]$

1. Sažetak

U ovom radu bilo je potrebno projektirati i realizirati konstrukciju jednog tlačnog zvona koje bi se koristilo za generiranje malih tlakova u mjernom području od 0 do 30mbar. Nakon uvodnog hidrodinamičkog proračuna krenulo se u dimenzioniranje te crtanje zvona sa svim sastavnim dijelovima u programima Solidworks i AutoCad gdje su osmišljeni i dimenzionirani tlačni i mjerni mehanizmi za generiranje malih tlakova. Potom se krenulo sa fizičkom izvedbom zvona da bi naposljetku eksperimentalno odredili karakteristike zvona. Dobiveni rezultati prikazani su u obliku grafova pomoću programa Matlab.

2. Uvod

Znanost je potpuno ovisna o mjerenju. Geolozi mjere udarne valove kad se nakon potresa osjećaju goleme sile, astronomi strpljivo mjere svjetlost s udaljenih zvijezda kako bi odredili njihovu starost, atomski fizičari skaču od veselja kad na temelju mjerenja koja traju milijuntinke sekunde mogu konačno potvrditi postojanje gotovo beskonačno male čestice a poznavanje mjerenja i kontrole tlaka vodene pare u prvim kotlovima praktički je omogućila industrijsku revoluciju. Mjerenje nam omogućuje uvid i razumijevanje svijeta oko nas. Ono nam daje čvrst i solidan odgovor na postavljena pitanja o našoj okolini te nam pruža oslonac za postavljanje novih. Znanost o mjerenju – mjeriteljstvo – vjerojatno je najstarija znanost u svijetu te je znanje o tome kako se ono primjenjuje temeljna potreba u praktično svim znanstveno utemeljenim zanimanjima a mjerenje tlaka njena je važna i sadržajna komponenta.



Slika 2.1. Grafički prikaz odnosa sile i tlaka

Danas mjerimo sve čega se dosjetimo. Dostupnost mjerne opreme i mogućnost njezine uporabe bitna je da bi znanstvenici mogli objektivno dokumentirati rezultate koje dobivaju. Da bismo opremu mogli kvalitetno koristiti, tj. da bi ona mogla vršiti svoju funkciju, oprema treba biti ispravna. Tu nailazimo na iznimnu važnost umjeravanja i određivanja mjerne nesigurnosti. Zanimljivo je da potreba za točnošću instrumenta proporcionalno raste sa smanjenjem veličina koje se mjere, odnosno što „sitnije“ mjerimo to nam su bitniji sve sitniji detalji.

U ovom radu će se pokušati razraditi jednostavna ideja o generiranju maloga tlaka od njezinog apstraktnog početka do stvarne realizacije koja će na eksperimentalan način utvrditi da li smo uspjeli u svom naumu a to je da na jednostavan način postignemo opipljive i konkretne rezultate sa stvarnom svrhom i primjenom.

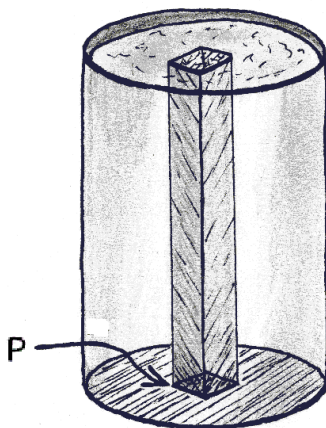
3. Pregled metoda za mjerenje malih tlakova [1]

3.1 Općenito o tlaku

Razvoj mjernja tlaka započeo je Torricellijevim eksperimentom 1643. god. kojim je pokazano da zemljin atmosferski omotač tlači površinu Zemlje tlakom koji odgovara približno 760 mm stupca žive. Od tada se tehnika mjerenja tlaka usavršila toliko da se danas mogu bez teškoća i dovoljno točno mjeriti vrlo niski i vrlo visoki tlakovi. Mjerna tehnika tlaka obuhvaća ogromno područje od oko 10^{-9} do 10^5 at. To područje se može pokriti samo različitim izvedbama instrumenata, koji djeluju na različitim principima. Mjerila tlaka nazivamo *manometrima*.

Tlak je definiran djelovanjem sile na jedinicu površine. Silom na neku površinu mogu djelovati kruto tijelo, tekućine ili plinovi. Ta sila može biti posljedica gibanja molekula neke tekućine, izazvanog njenim toplinskim stanjem, ili pak težina okomitog stupca te tekućine jednoliko raspoređene po vodenoj podlozi. Kod plinova i tekućina molekule međusobno djeluju istim tlakom pod kojim se nalazi čitava masa ili dio plina. U plinovima i tekućinama tlak djeluje u svim smjerovima jednakim intenzitetom. Kod krutih tijela tlak definiramo kao omjer sila međusobnog djelovanja u smjeru normale na dodirnu površinu i veličinu same površine.

Zračni omotač Zemlje djeluje svojom težinom na njenu površinu i na taj način izaziva atmosferski tlak. Težina zračnog omotača iznosi oko 1 kp po svakom cm^2 zemljine površine što izražavamo tlakom od 1 kp/cm^2 (1 kp = 9.81 N). Međutim važno je znati da tlak ovisi o trenutnoj težini tako zamišljenog stupca zraka, koja je podložna mnogim utjecajima, pa se atmosferski tlak stalno i nepravilno mijenja.



Slika 3.1. Ovisnost tlaka o težini zamišljenog stupca fluida [7]

Nizom mjerenja utvrđen je njegov normalni iznos na površini mora pri temperaturi od 15 °C pa se za normalni atmosferski tlak uzima:

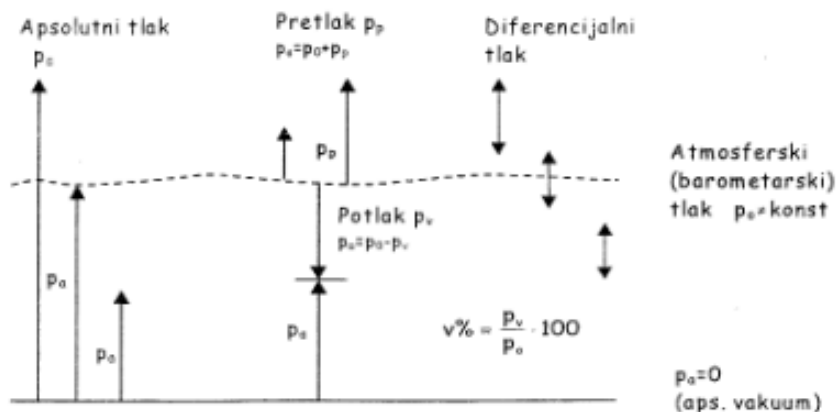
$$p_0 = 1 \text{ atm} = 760 \text{ mm Hg} = 1.03327 \text{ kp cm}^{-2} = 101325 \text{ Pa} \quad (3.1)$$

S obzirom na polaznu veličinu tlaka pri mjerenju postoji:

- 1) **Vakuum** – prazan prostor, koristi se i kao pojam za vrlo mali tlak sveden na najmanju ostvarivu vrijednost
- 2) **Apsolutni tlak** – tlak mjeren s obzirom na ništicu tj. vakuum
- 3) **Relativni tlak** – tlak mjeren s obzirom na atmosferski tlak

Razlika tlakova je bilo koja razlika tlakova mjerenih na dva mjesta u prostoru. S obzirom na razliku tlakova imamo (**Error! Reference source not found.**):

- **Nadtlak (pretlak)** – tlak veći od atmosferskog
- **Podtlak** – tlak manji od atmosferskog



Slika 3.2. Odnos tlakova

Instrumenti za mjerenje tlaka mjere uvijek razliku tlakova ovisno o tome koja im je referentna vrijednost, apsolutni ili relativni tlak. Kako se atmosferski tlak s vremenom mijenja ne može se uzeti kao referentna vrijednost kod točnijih mjerenja bez posebne kompenzacije tih promjena.

Osnovna jedinica za mjerenje tlaka je Pascal. 1 Pascal je definiran kao tlak kojeg proizvodi sila od 1 N kad jednoliko raspoređena djeluje na površinu od 1 m².

Tlak je u osnovi mehanički pojam koji se može u potpunosti opisati u terminima osnovnih SI jedinica *duljine, mase i vremena*.

Za fluid u mirovanju tlak se definira kao normalna sila na jedinicu površine:

$$p = \frac{dF}{dA} \quad (3.2)$$

Kao vektorska veličina, sila ima svoju veličinu i smjer, pa općenito postoje tri nezavisne komponente tlaka tj. naprezanja koje djeluju na površinu. Sva mjerila tlaka se koriste za mjerenja tlaka u fluidu, a ne u krutim tijelima. U mehanici fluida tlak je specifična težina w , prema visini h :

$$dp = w \cdot dh \quad (3.3)$$

Sva mjerenja (osnovna) tlaka se temelje na te dvije definicije.

Tlak je općenito rezultat djelovanja molekula unutar nekog fluida na stjenke posude. Ako posuda ne sadrži niti jednu molekulu tlak u njoj ima iznos nula, odnosno 100% vakuum. Tlak mjeren na skali koja koristi apsolutnu nulu kao referentnu vrijednost zove se **apsolutni tlak**, a tlak koji koristi tlak okoline kao referentnu vrijednost se naziva **pretlak**.

$$APSOLOTNI \ TLAK = TLAK \ OKOLINE + PRETLAK$$

Ostale jedinice tlaka:

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ at (tehnička atmosfera)} = 98066.5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ atm (fizikalna ili normalna atmosfera)} = 101325 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ mmHg} = 133.322 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ mmH}_2\text{O} = 9.80665 \text{ Pa}$$

3.2 Metode za mjerenje malih tlakova

Metode za mjerenje malih tlakova mogli bismo podijeliti u tri glavne skupine:

Cjevni manometri

- U cijev
- Mikromanometar
- Minimetar

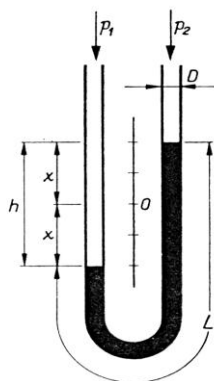
Tlačna zvona

Pretvornici tlaka

3.2.1 Cjevni manometri

Što se cjevnih manometara tiče za mjerenje malih tlakova mogu se koristiti:

3.2.1.1 U-manometar



Slika 3.3. U-manometar

Mjerenje s ovim manometrom zasniva se na istom principu kao i kod Torricellijevog barometra. Razlikuju se u izvedbi. Kalibrirana cijev savijena je u obliku slova U. Ovaj manometar mjeri relativni tlak $\Delta p = p_1 - p_2$, dakle razliku tlakova, pa se zove i *diferencijski manometar*.

Sila P_1 uslijed tlaka p_1 prenosi se kroz živu u desni krak gdje drži ravnotežu sa silom P_2 uslijed tlaka p_2 i težinom stupca žive G visine h .

$$P_1 = P_2 + G \quad (3.4)$$

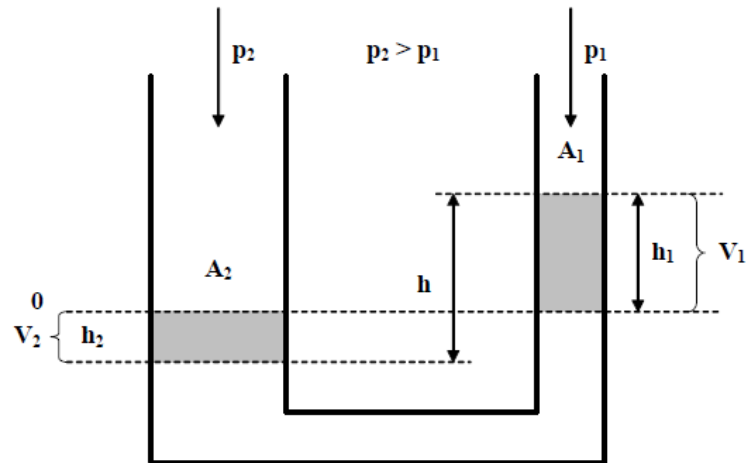
$$p_2 \frac{d^2 \pi}{4} = p_1 \frac{d^2 \pi}{4} + h \rho g \frac{d^2 \pi}{4} \quad (3.5)$$

$$\Delta p = p_1 - p_2 = h \rho g = h \gamma \quad (3.6)$$

Ovo je izraz sličan izrazu za Torricellijev manometar. U-manometrom se može mjeriti apsolutni tlak kad bi p_1 bio jednak 0, a što možemo postići evakuiranjem i zataljivanjem desnog otvora cijevi. Ipak, obično je desni otvor podvrgnut djelovanju atmosferskog tlaka pa u tom slučaju U-manometar služi za mjerenje relativnog pretlaka ili podtlaka. Univerzalnost primjene U-manometra je u tome što se dovodenjem bilo kakvih tlakova p_2 i p_1 uvijek mjeri njihova razlika. Tlakovi se najčešće dovode savitljivim gumenim cijevima koje se navuku na otvore. Smetnje su jednake kao i kod Torricellijevog manometra, jedino se greške uslijed kapilarnih pojava kompenziraju same od sebe zahvaljujući simetričnoj izvedbi manometra.

3.2.1.2 U-manometar nesimetrične izvedbe

U-manometar nesimetrične izvedbe ima cijevi s različitim površinama presjeka A_1 odnosno A_2 . Ako je $\Delta p = p_2 - p_1 = 0$ razine kapljevine su jednake u obje cijevi i pokazuju razinu 0. Ako $p_2 > p_1$ kao na slici, istisnuti obujmi moraju biti isti, no visine h_1 i h_2 bit će različite ovisno o površinama presjeka cijevi odnosno o njihovom omjeru.



Slika 3.4. U-manometar nesimetrične izvedbe

Uz pretpostavku da se u desnoj cijevi razina podigla za h_1 , a u lijevoj spustila za:

$$h_2 = h_1 \frac{A_1}{A_2} \quad (3.7)$$

uz razliku tlaka $\Delta p = p_2 - p_1 = \rho g h$ i uz $h = h_1 + h_2$ vrijedi:

$$h = h_1 + h_1 \frac{A_1}{A_2} = h_1 \left(1 + \frac{A_1}{A_2} \right) \quad (3.8)$$

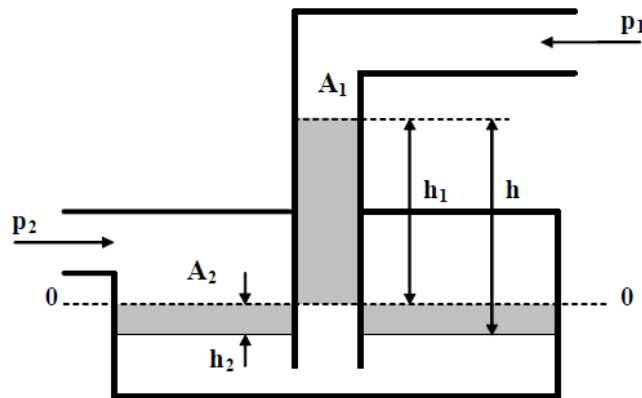
pa je:

$$\Delta p = p_2 - p_1 = h_1 \left(1 + \frac{A_1}{A_2} \right) \rho g \quad (3.9)$$

Ako je $A_2 \gg A_1$ onda je h_2 zanemarivo pa je $h=h_1$ što daje:

$$\Delta p = p_2 - p_1 \cong h_1 \rho g \cong h \rho g \quad (3.10)$$

3.2.1.3 Manometar s čašicom

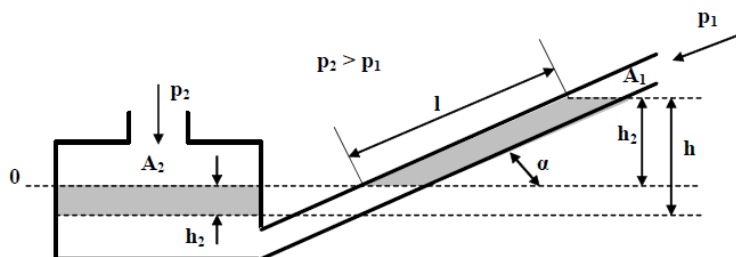


Slika 3.5. Manometar s čičicom

Manometar s čičicom radi u stvari kao U-manometar nesimetrične izvedbe, kod kojega je tanja cijev smještena u debljoj koja ima oblik čašice. Nesimetrija je ovdje jako naglašena tako da je $A_2 \gg A_1$. Na isti način može se dokazati da je $\Delta p = p_2 - p_1 \cong h_1 \rho g \cong h \rho g$.

Ova izvedba je pogodna za brzo određivanje razlike tlakova, jer je za to dovoljno samo jedno čitanje, ako se tolerira navedena pogreška.

3.2.1.4 Mikromanometar (manometar s priklojenom cijevi)



Slika 3.6. Manometar s priklojenom cijevi

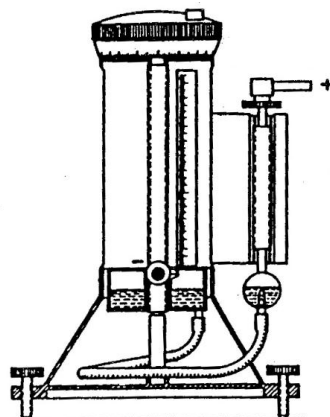
Manometar s priklojenom cijevi služi za mjerenje vrlo malih tlakova. Cijev je priklojena pod kutem α prema horizontali. Otklon u koso položenoj cijevi biti će proporcionalno uvećan sinusu kuta nagiba cijevi. Kada nastupi $p_2 > p_1$ kapljevina daleko dopire u kosu cijev pa je već za male vrijednosti Δp , l veliko, ako je kut priklona malen. Na sličan način kao i prije može se dokazati da je:

$$\Delta p = p_2 - p_1 = l \left(\frac{A_1}{A_2} + \sin \alpha \right) \rho g \cong l \rho g \sin \alpha \quad (3.11)$$

Da bi postigli što veće osjetljivosti potrebno je kut priklona učiniti što manjim. Ako se želi čitati direktno na skali (l) uz zanemarivu pogrešku tada treba udovoljiti uvjet da je $A_2 \gg A_1$. Za punjenje se obično uzima alkohol ili koja druga organska kapljevina.

Prednost ove izvedbe pred izvedbama s okomitim cijevima je ta što je ovdje pomak veći nego što je visina (h) pri istoj razlici tlakova Δp pa se može koristiti dulja skala. Ovakvi kapljevinski manometri s priklojenom cijevi vrlo su prikladni i jednostavni. Ako se instrument izvede s promjenjivim nagibom cijevi i kućištem od kovine naziva se *mikromanometar*. Mikromanometri su danas u jako čestoj uporabi.

3.2.1.5 Minimetar



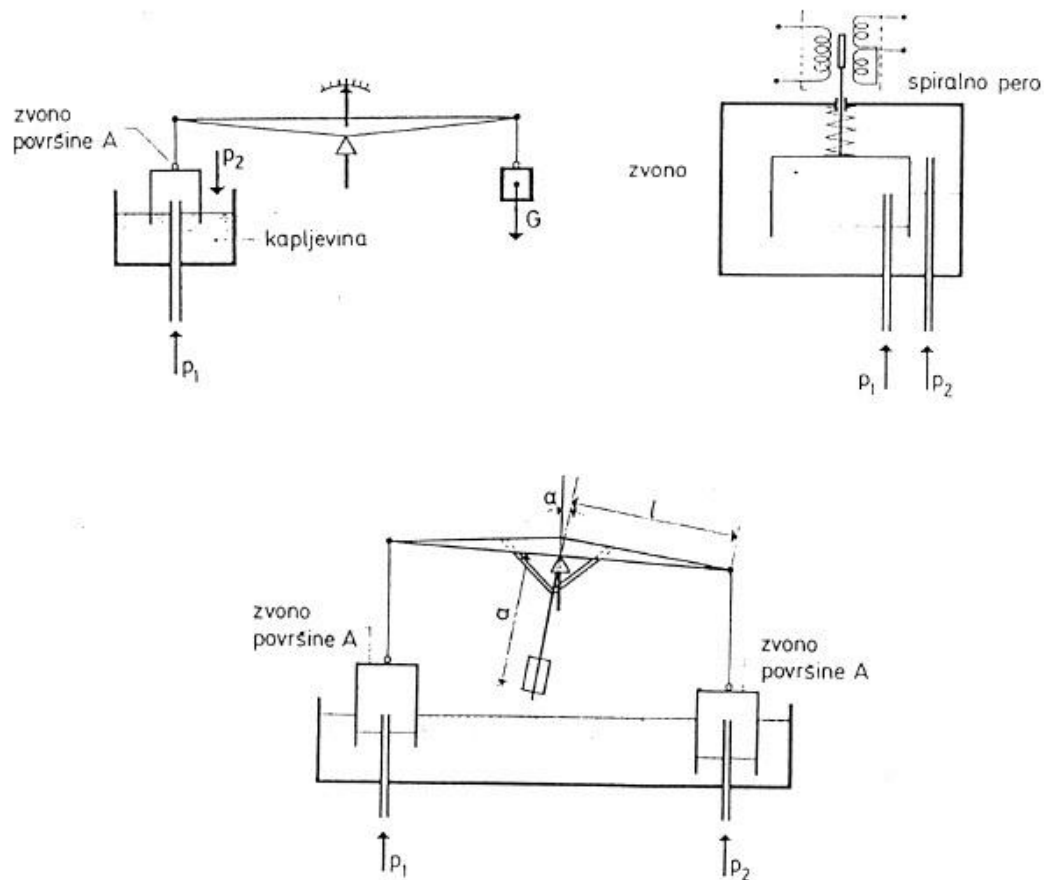
Slika 3.7. Minimetar

Minimetar se koristi kada su zahtjevi za točnost pri mjerenju malenih razlika tlakova naročito veliki. To je u stvari U-cijev u obliku dviju proširenih posuda, koje su međusobno spojene savitljivom cijevi. U fiksnoj proširenoj posudi, na koju se priključuje pretlak, nalazi se zlatni šiljak, koji pri izjednačenom tlaku, u nul položaju, upravo dodiruje razinu vode, kojom je napunjen instrument. Kada na instrument djeluje neka razlika tlaka podiže se druga posuda pomoću vretena sa vijkom sve dok opet šiljak upravo ne dosegne razinu vode. Ispravno podešavanje postiže se pomoću optičkog uređaja. Pošto u trenu očitavanja položaj razine vode ostaje isti, eventualne netočnosti u izvedbi instrumenta ili zbog kapilariteta nemaju utjecaj na točnost mjerenja. Pomoću mikrometarskog vijka mogu se razlike položaja razina vode očitavati vrlo precizno (u granicama 0,02 – 0,05 mm).

3.2.2 Tlačna zvona

Odlikuju se posebnom osjetljivošću, a djeluju na principu vage. Promjene tlaka pobuđuju promjenu momenta sila na vagi. Zvono se giba sve dok se ne uspostavi ravnotežni položaj koji je ujedno i mjera razlike tlaka. Protumoment mjerenoj razlici tlaka dobije se pomoću utega ili pera. Zakreti se pretvaraju u električni signal potenciometrijskim ili induktivnim pretvornikom pomaka.

Tlačno zvono možemo koristiti kao registracioni ili regulacioni instrument jer se odlikuje znatnim djelatnim silama dok mikromanometar ili minimetar ne možemo koristiti u te svrhe.



Slika 3.8. Zvonasti manometar [2]

3.2.3 Pretvornici tlaka [3]

Pretvornici tlaka pretvaraju mjereni tlak u analogni električni signal koji je razmjern primjenjenome tlaku.

U skladu s modelom izlazni signal može biti:

- naponski

- strujni
- frekvencijski

Kako bi se osigurala njihova funkcija pretvornici tlaka trebaju neprekidno napajanje stabilizirano na razinu povezanu s očekivanom nesigurnošću tlaka. [1]

3.2.4 Manometarske kapljevine

Kod punjenja manometara koriste se realne kapljevine pa je potrebno kod analize rada voditi računa o nekim njihovim svojstvima koja mogu imati utjecaj na točnost mjerenja (npr. adhezija, promjena specifične težine s temperaturom, indeks loma). Tako se zbog adhezije sa stijenkama posude uzimaju cijevi tanje od 5 mm. H₂O

Kod vode promjena specifične težine sa temperaturom dolazi do izražaja tek iznad 30°C gdje se ona smanjuje. S obzirom na kemijske reakcije kapljevine ne smiju ulaziti u reakcije s mjernim fluidom. Indeks loma mora biti različit od indeksa loma mjernog fluida.

Najpoznatije manometarske kapljevine su voda ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$) i živa ($\rho = 13595 \text{ kg/m}^3$).

Tlak izražen 1mm visine živinog stupca odgovara stupcu H₂O koji je visok 13.595mmH₂O. Osim njih koriste se: acetilentetrabromid ($\rho = 2965 \text{ kg/m}^3$), bromoform ($\rho = 2889 \text{ kg/m}^3$), tetraklorugljik ($\rho = 1594 \text{ kg/m}^3$).

Vrlo je praktičan tetraklorugljik (CCl₄) jer se ne miješa s vodom i lako se oboji bojama netopivim u vodi.

U radu sa manometrima treba voditi računa o gravitaciji na mjestu mjerenja za razliku od standardne gravitacije na koju je manometar baždaren. U takvom slučaju treba izvršiti korekciju:

$$h_n = h_{iz} \frac{g_{iz}}{g_n} \quad (3.12)$$

h_n - visina kapljevine za normalnu gravitaciju

h_{iz} -izmjerena visina kapljevine

g_n -normalna gravitacija (9.81 ms^{-2})

g_{iz} -točna gravitacija na mjestu mjerenja

Utjecaj temperature dan je izrazom:

$$h = h \frac{1 + \alpha t}{1 + \gamma} \quad (3.13)$$

h - visina stupca kapljevine na normalnoj temperaturi

t - visina stupca kapljevine na temperaturi T

α - koeficijent linearnog širenja skale

γ - koeficijent kubnog širenja skale

4. Pregled metoda za umjeravanje i ispitivanje

Mjeriteljske djelatnosti umjeravanja, ispitivanja i mjerenja vrijedni su ulazni elementi za funkcioniranje kakvoće u mnogim aktivnostima i postupcima u industriji i u svakodnevnome životu. Za to je potrebna sljedivost, koja postaje važna kao i samo mjerenje.

Mjerni etalon tvarna je mjera, mjerilo, referentna tvar ili mjerni sustav namijenjen za određivanje, ostvarivanje, čuvanje ili obnavljanje jedinice ili jedne ili više vrijednosti kakve veličine kako bi mogli poslužiti kao referenca.

Lanac sljedivosti neprekidan je lanac usporedaba od kojih svaka ima utvrđenu mjernu nesigurnost. Time se osigurava da mjerni rezultat ili vrijednost etalona bude povezana s referentnim etalonima na višoj razini, koji u konačnici završavaju s primarnim etalom.

Krajnji korisnik može postići sljedivost do najviše međunarodne razine izravno od nacionalne mjeriteljske ustanove (NMI) ili od sekundarnoga umjernog laboratorija, u pravilu akreditiranog laboratorija.

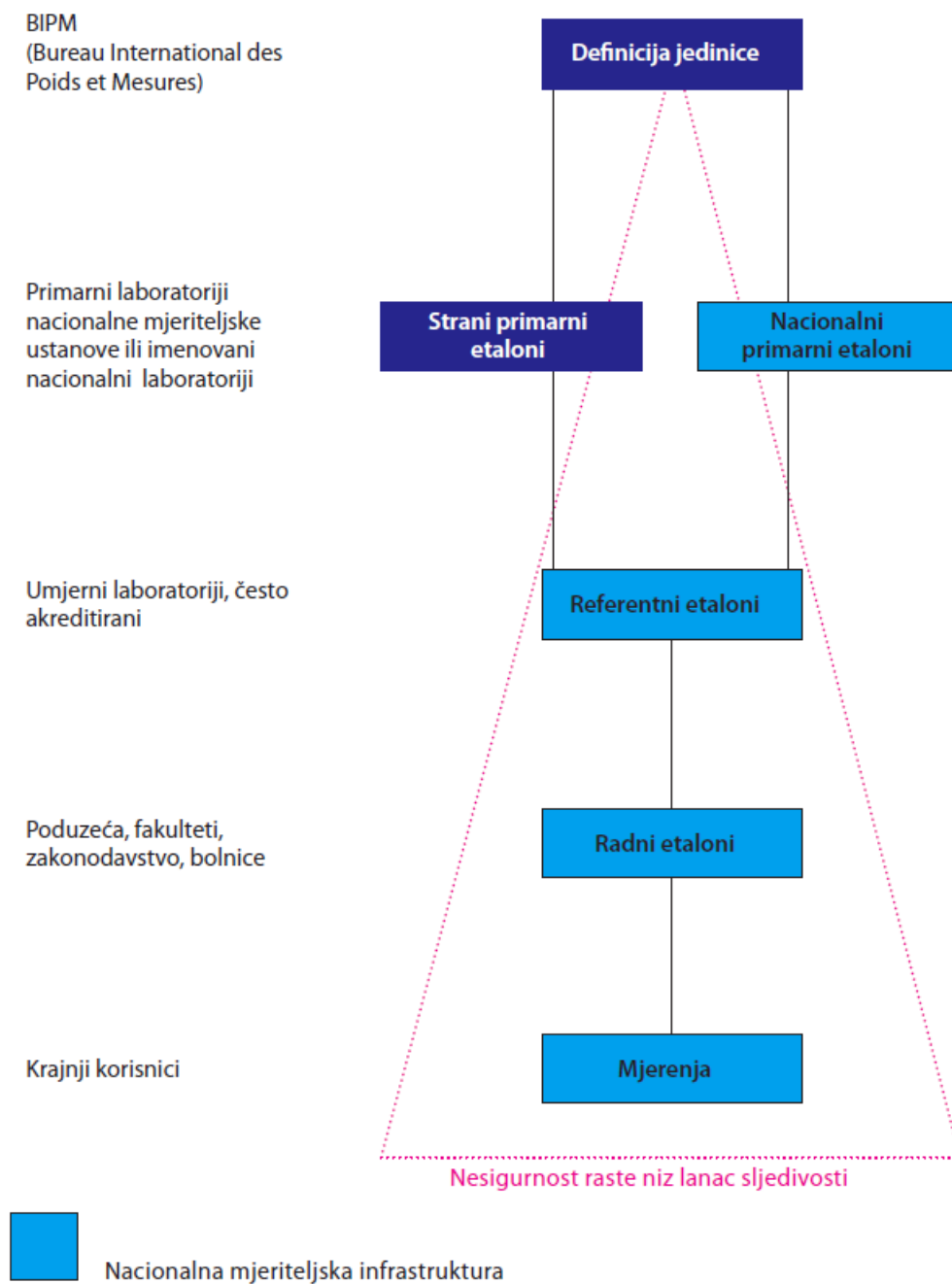
Umjeravanje mjerila, mjernog sustava ili referentne tvari temeljno je oruđe za osiguravanje mjerne sljedivosti. Umjeravanje obuhvaća određivanje mjeriteljskih značajki mjerila, mjernog sustava ili referentne tvari. Ono se, u pravilu, postiže izravnom usporedbom s etalonima ili potvrđenim referentnim tvarima. O umjeravanju se izdaje potvrda o umjeravanju, a najčešće se na umjereno mjerilo stavlja naljepnica.

Četiri su glavna razloga za umjeravanje mjerila:

1. uspostavljanje i prikaz sljedivosti
2. osiguravanje da očitavanja mjerila budu sukladna s drugim mjerenjima
3. određivanje točnosti očitavanja mjerila
4. utvrđivanje pouzdanosti mjerila, tj. može li mu se vjerovati

Nesigurnost je količinska mjera kakvoće mjernog rezultata, koja omogućuje da se mjerni rezultati uspoređuju s drugim rezultatima, referencijama, specifikacijama ili etalonima.

Sva mjerenja podliježu pogreškama, čime se mjerni rezultat razlikuje od istinite vrijednosti mjerene veličine. Uz dano vrijeme i sredstva, većina se izvora mjerne pogreške može identificirati, a mjerne pogreške mogu količinski odrediti i ispraviti, npr. umjeravanjem.[6]



Slika 4.1. Prikaz rasta nesigurnosti niz lanac sljedivosti



Slika 4.2. Regionalne mjeriteljske organizacije diljem svijeta

Za umjeravanje i ispitivanje manometara relevantne su dvije metode:

- 1.) EURAMET/cg-17/v.01 Upute za umjeravanje elektromehaničkih manometara (*Guidelines on the Calibration of Electromechanical Manometers*)
- 2.) DKD-R 6-1 Priručnik za umjeravanje manometara (*Calibration of Pressure Gauges*)

4.1 EURAMET/cg-17/v.01 Upute za umjeravanje elektromehaničkih manometara [2]

Svrha Euramet/cg-17 uputa za umjeravanje elektromehaničkih manometara jest poboljšanje usklađivanja laboratorija u mjerenju tlaka. Upute služe kao savjet umjernim laboratorijima za uspostavljanje praktičnih postupaka te kao sredstvo promicanja dosljednoga pristupa akreditaciji laboratorija.

Upute se primjenjuju na sve elektromehaničke manometre za mjerenje apsolutnoga, manometarskoga ili diferencijalnoga tlaka uključujući i vakuumske uređaje za mjerenje tlaka ispod 1 kPa, tj. bave se postupcima umjeravanja pretvornika tlaka, transmitera tlaka te manometrima s digitalnim ili analognim pokazivanjem (upute se ne odnose na piezoelektrične pretvornike tlaka).

Upute se sastoje od dva glavna poglavlja:

4.1.1 Postupak umjeravanja u laboratoriju

Opisuju se metode umjeravanja gdje primijenjeni postupak ovisi o očekivanoj točnosti mjerila u skladu sa zahtjevom korisnika

Također treba voditi računa da postupak umjeravanja treba ako je to prikladno u skladu sa zahtjevom korisnika omogućiti određivanje histereze, linearnosti i ponovljivosti mjerila koje se umjerava.

Postupci umjeravanja mogu biti:

1) Temeljni postupak umjeravanja

Temeljni postupak umjeravanja treba upotrebljavati za mjerila za koja je očekivana povećana mjerna nesigurnost ($k=2$) $U > 0,2 \% FS$. Umjeravanje se provodi jednom na 6 tlakova pri rastućim i padajućim tlakovima. Ponovljivost se procjenjuje iz tri opetovana mjerenja na jednome tlaku (po mogućnosti 50 % FS).

2) Normirani postupak umjeravanja

Za mjerila za koja je očekivana povećana mjerna nesigurnost ($k=2$) $0,05 \% FS \leq U \leq 0,2 \% FS$ treba upotrebljavati normirani postupak umjeravanja. Umjeravanje se provodi jednom na 11 tlakova pri rastućim i padajućim tlakovima. Ponovljivost se procjenjuje iz umjeravanja u četiri tlaka (po mogućnosti 0, 20, 50, 80 % FS) koji se opetuju tri puta.

3) Cjelovit postupak umjeravanja

Cjelovit postupak umjeravanja treba upotrebljavati za mjerila za koja je očekivana povećana mjerna nesigurnost ($k=2$) $U < 0,05 \% FS$. Umjeravanje se provodi na 11 tlakova u tri mjerna niza.

4.1.2 Određivanje mjerne nesigurnosti

Opisuju se opći aspekti određivanja mjerne nesigurnosti te su objašnjeni postupci određivanja karakterističnih vrijednosti važnih za nesigurnost.

4.2 DKD-R 6-1 Priručnik za umjeravanje manometara [3]

DKD-R 6-1 služi kao priručnik laboratorijima za umjeravanje u kojem su opisani razni tehnički i organizacijski procesi umjeravanja manometara koji mogu poslužiti kao model za uspostavljanje internih procedura i regulativa u laboratorijima. Primjena opisanih metoda u priručniku nalaže uspostavljanje jednakih ili sličnih praksi pri umjeravanju manometara u laboratorijima koje za posljedicu vode ka dužem kontinuiranom radu i višoj vjernosti rezultata laboratorija.

Priručnik služi kao referenca za određivanje najnižih zahtjeva metoda za umjeravanje i za određivanje mjerne nesigurnosti pri umjeravanju. Upute su primjenjive za transmitere tlaka, manometre s digitalnim ili analognim pokazivanjem te za pretvornike tlaka sa električnim izlazom za apsolutni tlak, diferencijalni tlak i pretlak sa pozitivnim i negativnim vrijednostima.

U uputama se opisuju zahtjevi i uvjeti za samo umjeravanje.

Navedene su i objašnjene metode za umjeravanje manometara te su objašnjeni postupci određivanja vrijednosti mjerne nesigurnosti na primjerima umjeravanja Bourdonove cijevi, pretvornika tlaka i transmitera tlaka zajedno sa navedenim i opisanim relevantnim parametima za analizu mjerne nesigurnosti. Također je pridodana procjena rezultata umjeravanja te numerički i grafički pregled rezultata umjeravanja.

5. Opis zadatka i uvod u zadanu problematiku

Kao što je već navedeno potrebno je projektirati i realizirati etalonski sustav koji će moći generirati stalan tlak u mjernom području od 0 do 30mbar. U osnovi sustav se mora sastojati od tlačnog mehanizma za generiranje malih tlakova te od mjernog mehanizma koji bi pratio i mjerio generiranje tlakova. Poseban zahtjev na sustav je generiranje *stalnog* tlaka uz visoku točnost ponavljanja kako bi se sustav mogao koristiti za provjeravanje drugih manometara ili pretvornika tlaka. Za tako osmišljen sustav potrebno je provesti hidrodinamički proračun te ga potom skicirati i dimenzionirati pazeći pritom na tehnološku i ekonomsku izvedivost realizacije samog manometra.

6. Ponuđeno rješenje za zadani problem

Za opisani problem osmišljen je zvonasti manometar. Prema početnom zahtjevu na mjerno područje od 0 do 30mbar pomoću hidrodinamičkog proračuna dobiveni su početni odnosi među geometrijskim i/ili tlačnim veličinama zvonastog manometra, npr. odnos između promjera i dubine zvona, odnos između dubine hoda zvona pri utjecaju nadodane mase i porasta hidrodinamičkog tlaka itd... Sa tako dobivenim odnosima bilo je potrebno odrediti i fiksirati stvarne (realne) dimenzije te se proračun vršio paralelno sa dimenzioniranjem zvonastog manometra. Sheme sa pripadajućim dimenzijama nacrtane su u programima AutoCad i Solidworks radi preglednosti i finalnih izmjena, većinom radi tehnoloških zahtjeva, odabira jeftinijih metoda izrade i obrade dijelova te zbog eventualnog prostora za uštedu na materijalu.

7. Proračun zvonastog manometra

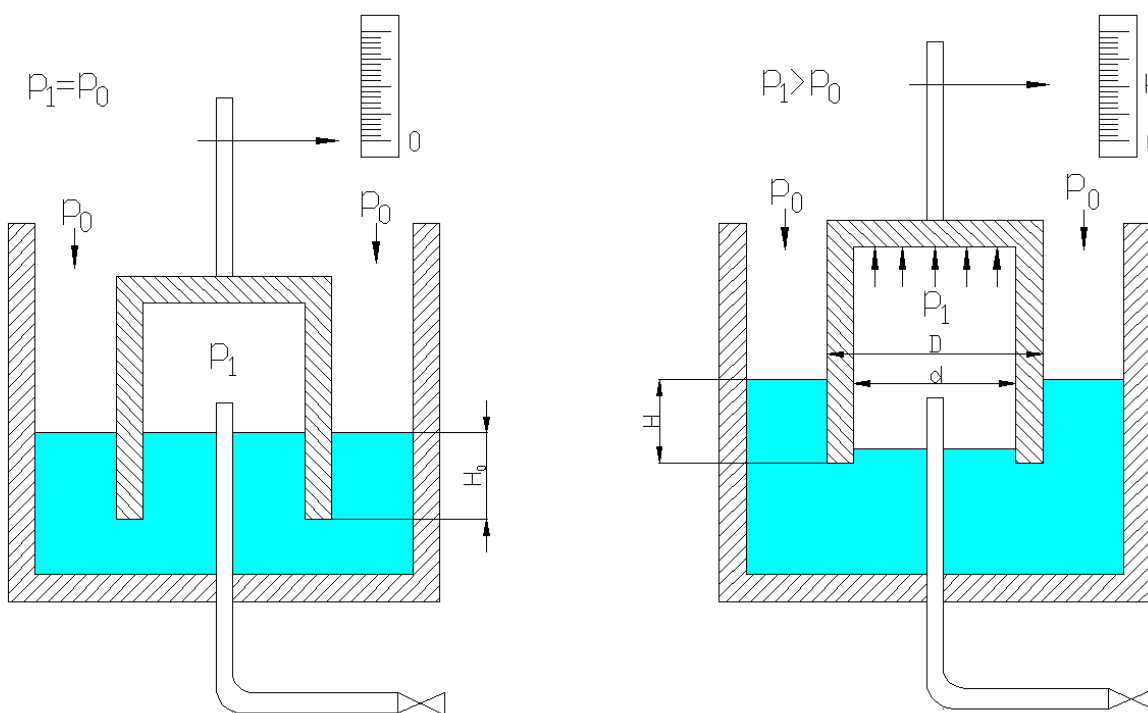
Zvonasti manometar je vrlo osjetljiv instrument za mjerenje malenih razlika pritisaka. Metoda mjerenja počiva na promjeni položaja jednog zvonastog tijela koje je uronjeno i pliva na nekoj tekućini. Instrument se sastoji iz zvona sa tankim stijenama koje je svojim otvorenim dnom uronjeno u posudu sa tekućinom. Recimo da se mjerni pritisak p_1 privodi putem jedne cijevi ispod šupljine zvona. Na zvono i tekućinu u posudi djeluje vanjski tlak p_0 . Do koje će dubine zvono uroniti u tekućinu ovisi o ravnoteži sila koje na njega djeluju, a to su težina „ G “, sila pritiska na zvono „ $(p_1 - p_0)$ “ i uzgon „ U “.

Kod ravnoteže sila mora biti:

$$G = (p_1 - p_0)F + U \quad (7.1)$$

Kada je tlak koji se mjeri i koji djeluje pod zvonom jednak vanjskom tlaku ($p_1 = p_0$) na zvono djeluju samo sila težine i uzgona, te će zvono maksimalno uroniti u tekućinu za „ H_0 “. Ako je „ D “ vanjski, a „ d “ unutarnji promjer zvona, tad će sila uzgona iznositi:

$$U = (D^2 - d^2) \frac{\pi}{4} g \rho H_0 = G \quad (7.2)$$



Slika 7.1. Shema rada zvonastog manometra

Pošto je za $p_1 = p_0$ i $G = U$, gornji izraz predstavlja i težinu zvona.

Ako je privedeni tlak p_1 veći od vanjskog zvono će se izdići za visinu „ h “, te će tad biti uronjeno u tekućinu samo za visinu „ H “.

Visina za koju se zvono izdiglo, a koja se može mjeriti na priključenoj skali, proporcionalna je razlici pritisaka $p_1 - p_0$.

To slijedi iz zakona ravnoteže sila:

$$G = (p_1 - p_0)d^2 \frac{\pi}{4} + (D^2 - d^2) \frac{\pi}{4} g \rho H \quad (7.3)$$

$$(p_1 - p_0)d^2 \frac{\pi}{4} = (D^2 - d^2) \frac{\pi}{4} g \rho H_0 - (D^2 - d^2) \frac{\pi}{4} g \rho H \quad (7.4)$$

$$(p_1 - p_0) = \frac{(D^2 - d^2)}{d^2} g \rho (H_0 - H) \quad (7.5)$$

a pošto je

$$H_0 - H = h \quad (7.6)$$

slijedi da je

$$(p_1 - p_0) = \left(\frac{D^2}{d^2} - 1 \right) \rho g h \quad (7.7)$$

Iz ovog je izraza vidljivo da će za istu razliku pritisaka ($p_1 - p_0$) pomak zvona „ h “ biti to veći što je razlika između „ D “ i „ d “ manja, što znači da će zvonasti manometar to osjetljivije reagirati na promjene pritiska, što je veći promjer zvona i što su stijenke zvona tanje.

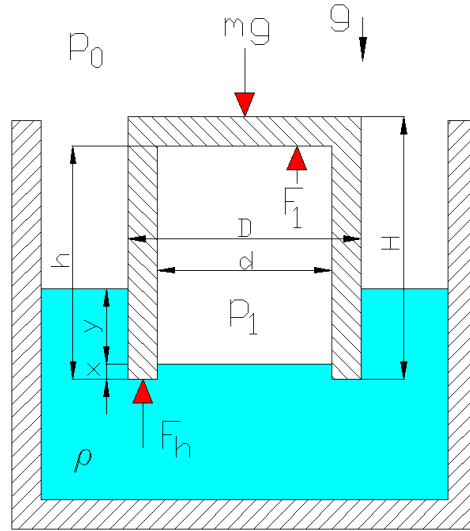
Intenzitet djelatne sile dobiva se povoljnim odabiranjem promjera zvona. Područje upotrebe zvonastih manometara ograničeno je na niske vrijednosti apsolutnih pritisaka, a mjerni opseg iznosi do kojih 200-300Pa.[8]

Tako opisani općeniti princip rada zvonastog manometra može se primjeniti za naš zadatak. Računski ćemo izračunati te ujedno i pretpostaviti budući pretlak zraka u zvonastom manometru kada je zvono opterećeno samo svojom težinom. Za gustoću nehrđajućeg čelika uzeto je $\rho_{\text{č}} = 8500 \text{ kg/m}^3$, gustoću vode $\rho_w = 998 \text{ kg/m}^3$. Također pretpostavljamo da je posuda u trenutku prije uranjanja bila ispunjena zrakom na atmosferskom tlaku $p_a = 1.013 \text{ bar}$. Za potrebe ovog izračuna možemo pretpostaviti izotermnu kompresiju zraka unutar posude. Također ćemo zanemariti težinu zraka. [9]

Za ostale dimenzije uzimamo:

- visina unutarnje posude $H=260\text{mm}$
- visina unutarnje posude do poklopca $h=259\text{mm}$

- vanjski promjer unutarnje posude $D=210\text{mm}$
- unutarnji promjer unutarnje posude $d=208\text{mm}$



Slika 7.2. Shema zadatka

Pretlak unutar zvona računamo iz jednadžbe manometra

$$p_{pr} = \rho g y \quad (7.8)$$

Iz uvjeta plivanja suma sila u vertikalnom smjeru jednaka je nuli

$$mg = \rho g y \frac{d^2 \pi}{4} + \rho g (y + x) \frac{D^2 - d^2}{4} \pi = \rho_{\check{c}} g \left(\frac{D^2 \pi}{4} H - \frac{d^2 \pi}{4} \right) \quad (7.9)$$

$$y + (y + x) \left(\frac{D^2}{d^2} - 1 \right) = \frac{\rho_{\check{c}}}{\rho} \left(\frac{D^2}{d^2} H - h \right) \quad (7.10)$$

Iz uvjeta izotermne kompresije slijedi relacija:

$$p_a h = (p_a + \rho g y)(h - x) \quad (7.11)$$

Rješenjem ovih dvaju jednadžbi po nepoznanicama x i y dolazi se do rješenja. Nakon sređivanja sistem jednadžbi poprima oblik:

$$x = h\rho g \frac{y}{(p_a + \rho g y)} \quad (7.12)$$

$$y = x \left(\frac{d^2}{D^2} - 1 \right) + \frac{\rho \check{c}}{\rho} \left(H - h \frac{d^2}{D^2} \right) \quad (7.13)$$

Uvođenjem pomoćnih varijabli

$$A = \frac{d^2}{D^2} - 1 \quad (7.14)$$

$$B = \frac{\rho \check{c}}{\rho} \left(H - h \frac{d^2}{D^2} \right) \quad (7.15)$$

$$A = -0.0189$$

$$B = 0.05$$

$$x = h \frac{y}{\left(\frac{p_a}{\rho g} + y \right)} \quad (7.16)$$

$$x = h \frac{Ax + B}{\left(\frac{p_a}{\rho g} + Ax + B \right)} \quad (7.17)$$

$$Ax^2 + \left[\frac{p_a}{\rho g} + B - Ah \right] x - Bh = 0 \quad (7.18)$$

$$C = \left[\frac{p_a}{\rho g} + B - Ah \right] \quad (7.19)$$

$$Ax^2 + Cx - Bh = 0 \quad (7.20)$$

Rješenjem kvadratne jednadžbe izračunava se rješenje

$$x = \left[\frac{\frac{1}{2A} \left[-C + (C^2 + 4ABh)^{\frac{1}{2}} \right]}{\frac{1}{2A} \left[-C - (C^2 + 4ABh)^{\frac{1}{2}} \right]} \right] \quad (7.21)$$

$$x = \left(\frac{0.01193}{572.63} \right) m \quad (7.22)$$

pa se usvaja fizikalno rješenje $x = 0.01193m$

$$y = x \left(\frac{d^2}{D^2} - 1 \right) + \frac{\rho \check{c}}{\rho} \left(H - h \frac{d^2}{D^2} \right) \quad y = 0.0497m$$

$$p_{pr} = \rho g y = 486.58 Pa \approx 4.86 mbar$$

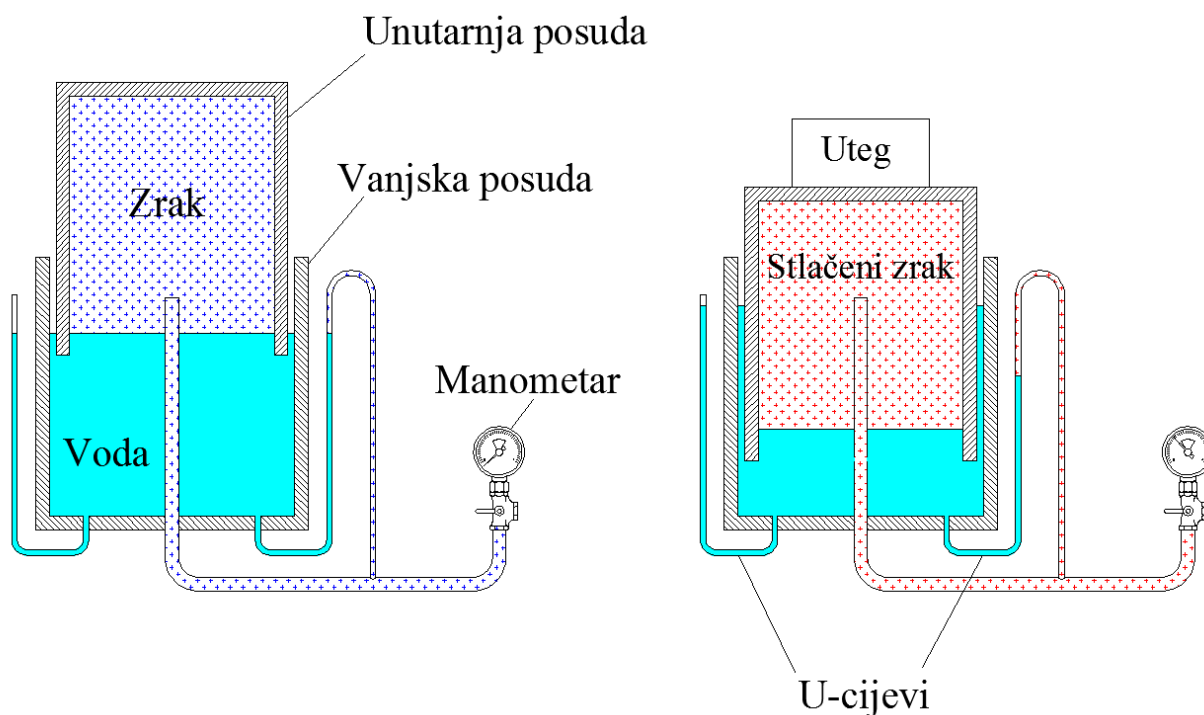
$$p_{uk} = \rho g y + p_a \qquad p_{uk} = 1.01786 \cdot 10^5 Pa \qquad (7.23)$$

Dobivena je pretpostavljena vrijednost pritiska zraka u zvonastom manometru u iznosu od $p_{pr} = 486.58 Pa$ odnosno da je vrijednost apsolutnog tlaka unutar zvonastog manometra samo uslijed njegove težine $p_{uk} = 1.01786 \cdot 10^5 Pa$.

8. Konstrukcija zvona

Kako je i prije navedeno naš sustav mora sadržavati tlačni mehanizam za generiranje malih tlakova te mjerni mehanizam koji bi pratio rad zvonastog manometra.

Za tlačni mehanizam smišljena je posuda koja se puni vodom. Potom se u djelomično napunjenu posudu stavlja druga posuda manjeg promjera zatvorena poklopcem odozgo. Time se „zarobi“ zrak u manjoj posudi te se pod utjecajem težine same posude (cilindra s poklopcem) te pod utjecajem eventualno nadodanih utega zarobljeni zrak počinje tlačiti.



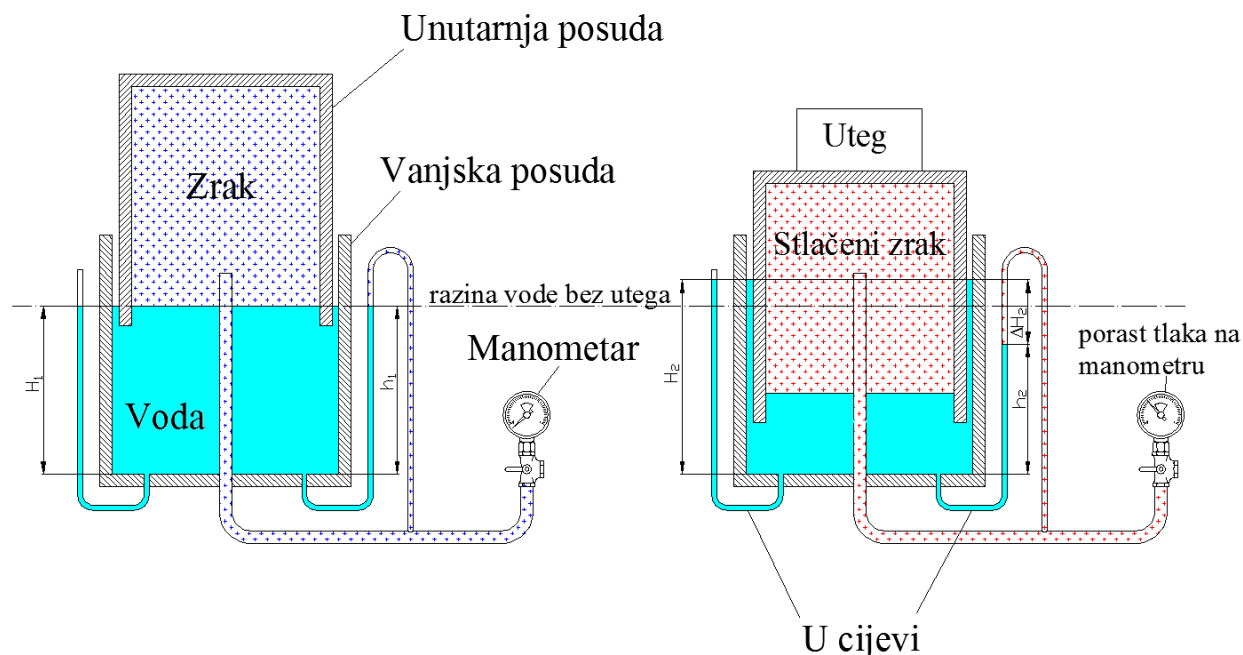
Slika 8.1. Shema tlačnog mehanizma za generiranje malih tlakova

Očito je da pretlak u posudi raste sa povećanjem težine utega. Konstrukcijski maksimum pretlaka se postiže kada unutarnja posuda dotakne dno vanjske posude pod utjecajem težine utega ili ako razina vode između dvaju posuda dostigne visinu oboda vanjske posude. Iz toga slijedi da postoji optimalna količina vode sa kojom je moguće ostvariti maksimalni pretlak unutar posude.

Ovako dizajniran tlačni sustav odlikuje se dobrom stabilnošću tlaka i dobrom ponovljivošću pošto je zrak zarobljen unutar posude. Voda ima dvojnu ulogu. Služi za ostvarivanje sile uzgona na unutarnju posudu te omogućuje „plutanje“ posude gore-dolje koje je direktni preduvjet za tlačenje zraka unutar posude. Sekundarno, voda automatski služi kao dobra brtva između zraka i

okoline te sprječava zrak da izađe iz posude. Šuplja cijev postavljena unutar zvonastog manometra direktno je spojena na neki drugi manometar ili registar tlaka. Pomoću nje i nekog kalibratora tlaka možemo odrediti mjerno područje našeg zvonastog manometra, ili, kada ćemo znati karakteristiku našeg manometra, možemo i provjeravati druge uređaje na točnost mjerenja tlaka.

Mjerni mehanizam se sastoji od dvije U-cijevi. Prva U-cijev je sa jedne strane spojena na dno vanjske posude a drugim krajem otvorena prema atmosferi. Prema tome ona mjeri hidrostatski tlak vode u posudi, a visinom stupca upravo odgovara razini vode između dvaju posuda. Druga U-cijev također je jednim krajem spojena na dno vanjske posude međutim sa drugim krajem je spojena na glavnu cijev koja vodi iz središta zvonastog manometra do manometra spojenog na drugom kraju. U tom slučaju razina vode u toj U-cijevi je rezultat djelovanja hidrostatskog tlaka u vanjskoj posudi te djelovanja pretlaka u unutarnjoj posudi.



Slika 8.2. Shema mjernog mehanizma

Jasno je da u je prvom slučaju kada nema opterećenja na unutarnju posudu tlak unutar posude jednak atmosferskom te da obje U-cijevi pokazuju istu razinu vode, a to je upravo razina hidrostatskog tlaka vode u vanjskoj posudi te se ona mijenja ovisno o količini napunjene vode. Međutim, u drugom slučaju kada opteretimo unutarnju posudu sa nekim utegom, sila utega

uzrokuje stlačivanje tlaka unutar posude što direktno rezultira promjenom razine vode u drugoj U-cijevi, i to u smislu pada razine vode. Također valja napomenuti da razina vode u prvoj U-cijevi proporcionalno raste s povećanjem težine utega.

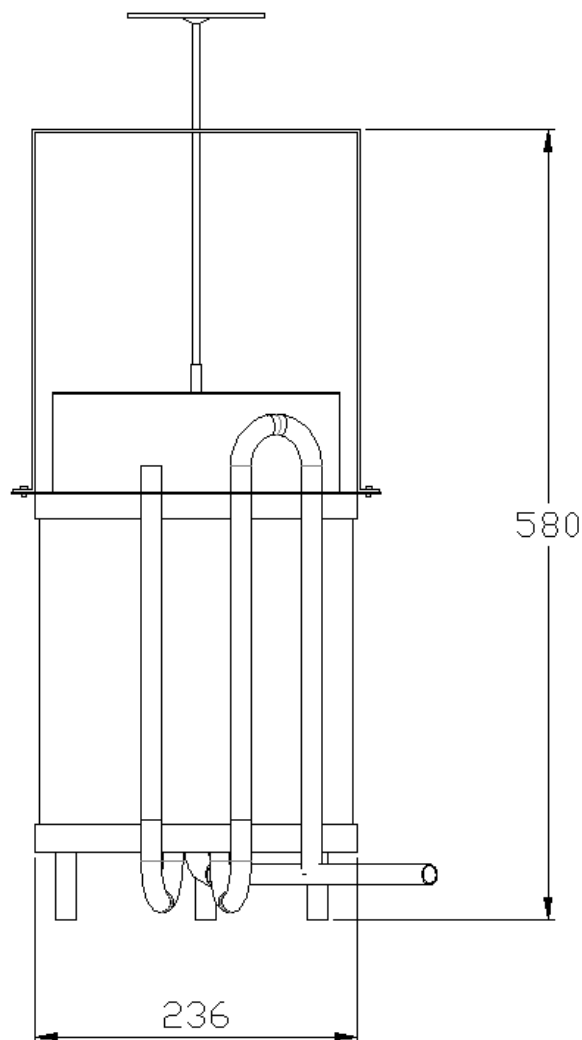
Iz shematskog prikaza je jasno vidljiv pomak razine prve U cijevi prema gore od razine vode bez utega te pomak razine vode druge U-cijevi prema dolje. Njihova razlika je označena sa ΔH_2 . Što je veće težinsko opterećenje to je veća razlika između dvaju tlakova.

9. Fizička izvedba zvona

Nakon što je zvono u potpunosti osmišljeno sa pripadajućim proračunima i dimenzijama krenulo se u samu realizaciju zvona. Zvono je podijeljeno na sastavne dijelove te se osmislio postupak izrade dijelova, njihove obrade te krajnjeg spajanja u sklop.



Slika 9.1. Sklopljeni zvonasti manometar



Slika 9.2. Pogled na zvonasti manometar

Kako je postalo očito da zvono nije moguće izraditi samostalno, kako zbog manjka iskustva rukovanja sa čelikom i sličnim materijalima tako i zbog manjka pristupa specijaliziranim strojevima za obradu materijala, bilo je potrebno potražiti tvrtku koja će izraditi zvono. Nakon nešto traženja po internetu i nekoliko razgovora preko telefona odabrana je tvrtka „Somek“ na temelju dobrih preporuka i velikog iskustva tvrtke te naravno zbog dobre opremljenosti tvrtke koja može u potpunosti odgovoriti na tehnološke zahtjeve izrade te realizirati i sklopiti zvono u konačan proizvod u zadanom vremenskom roku.



Slika 9.3. Izrada zvona

Kako je zvono prvenstveno osmišljeno da ga se uranja u vodu, ono je skoro u cijelosti izrađeno od nehrđajućeg čelika. Aluminij, koji iako kao materijal u ovom slučaju ima prednost ispred čelika zbog svoje manje gustoće pa zbog toga i težine, ipak nije korišten pri izradi zvona zbog poteškoća s aluminijem pri zavarivanju.

Zavarivanje se vršilo TIG postupkom. TIG (engl. Tungsten Inert Gas) je ručni postupak zavarivanja u neutralnom zaštitnom plinu ili neutralnoj smjesi plinova, koji koristi netaljivu volframovu elektrodu i posebno dodatni materijal. Svojstvo ovog postupka je stabilan električni luk i visoko kvalitetan zavar, ali zahtjeva izuzetne vještine zavarivača i relativno je spor. Najčešće se koristi za zavarivanje nehrđajućih čelika i lakih metala (aluminijeve legure, titanijeve legure) [4].

Specifikacije zvona:

- Težina ukupnog zvona iznosi 5.8kg
- Težina „plutajućeg“ cilindra iznosi 1.9kg
- Volumen „plutajućeg“ cilindra iznosi $0.036m^3$
- Hod „plutajućeg“ cilindra iznosi 30mm



Slika 9.4. Zavarivanje TIG postupkom

Zvono se sastoji od ukupno 32 dijela.

Vrijeme izrade zvona se pretpostavlja da je bilo između 25 i 30 radnih sati a na njemu je radilo dvoje ljudi.

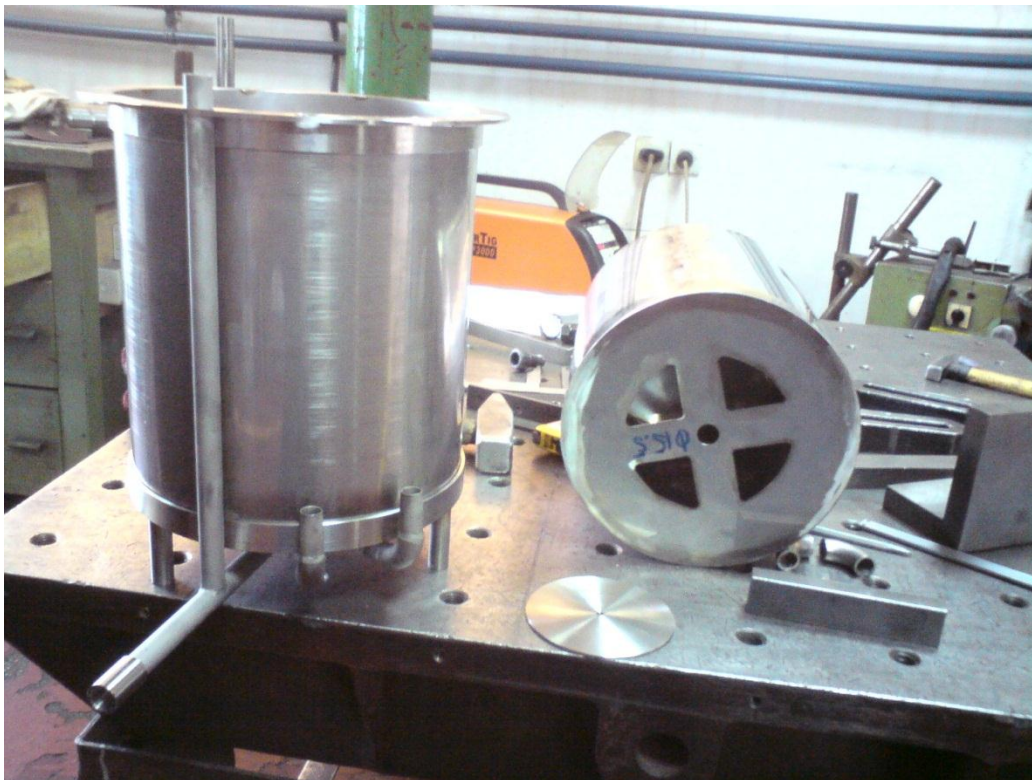
Postupak izrade zvonastog manometra:

- Za izradu vanjske i unutarnje posude limovi debljine 1mm su prvo rezani plazmom te potom valjani u oblik cilindra. Zavareni su TIG postupkom
- Podnica vanjske posude rezana je plazmom te bušena svrdlom
- Podnica unutarnje posude rezana je plazmom, bušena svrdlom te potom dodatno obrađena glodanjem
- Poklopac unutarnje posude rezan je plazmom
- Obrub zvona izrađen je tokarenjem iz jednog cilindričnog komada čelika
- Postolje je izrađeno tokarenjem iz jednog cilindričnog komada čelika
- Nogice su rezane iz čelične šipke te potom zavarene za postolje

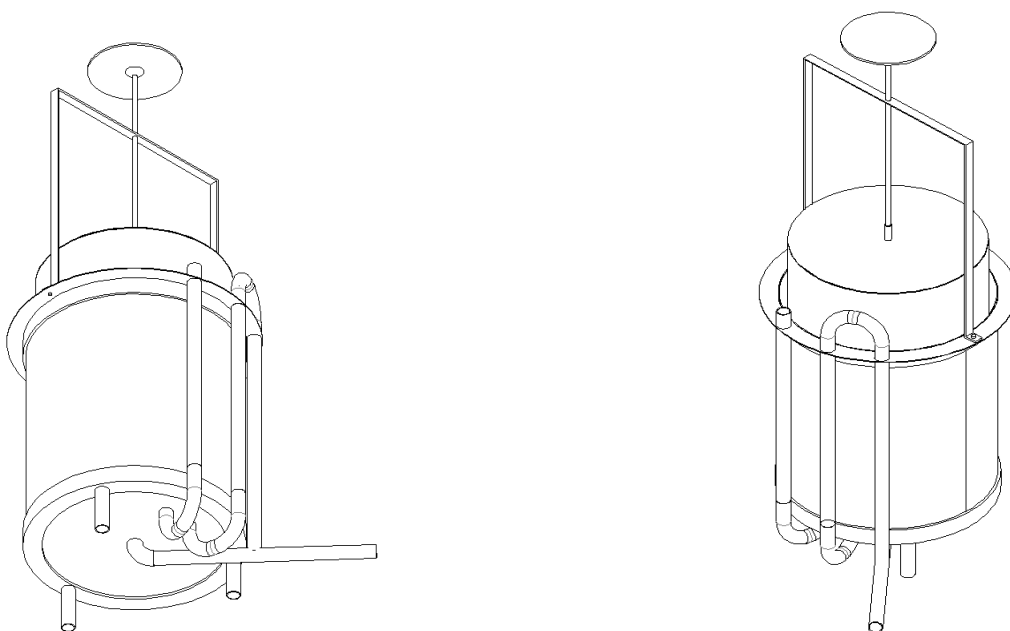
- Vodilica je izrađena spajanjem triju komada čelika pomoću TIG zavarivanja. Oslonci vodilice su dobiveni piganjem. Izrađena je od običnog konstrukcijskog čelika
- Klizač je izrađen od jednog komada čelične šipke te su potom narezani navoji M5x0.5 na obje strane šipke
- Postolje za uteg je izrađeno tokarenjem iz jednog cilindričnog komada čelika
- Cijevi su izrađene od nehrđajuće čelične šipke promjera 15x1.5mm koje su potom pjeskarene
- Cjevna koljena promjera su 17x2mm, kupljena su u tvrtki „Strojopromet“ (u idejnom projektu je bio zamišljen promjer 15x1.5mm međutim nije bilo moguće nabaviti promjer manji od 17x2mm), obrađena su pjeskarenjem
- Manometarske cijevi napravljene je od prozirne plastike promjera 15x1.5mm



Slika 9.5. Izrada zvona



Slika 9.6. Izrada zvona



Slika 9.7. Izometrijski pogled na zvonasti manometar

10. Određivanje karakteristika zvonastog manometra

Nakon izrade i finalnog sklapanja zvonastog manometra uslijedilo je i ispitivanje zvona i određivanje njenih karakteristika.

Zvonasti manometar se prvo napunio vodom da se provjeri nepropusnost samih zavara te da se ispita sama konstrukcija zvona. Nakon što je ustanovljeno da zavari ne propuštaju te da zvono „pluta“ započeto je određivanje karakteristika zvona. To se napravilo u dva koraka:

10.1 Ispitivanje mjernog područja zvonastog manometra

Za određivanje bilo kakvih karakteristika manometra prvo je bilo potrebno odrediti njegovo mjerno područje te potrebnu količinu vode za ostvarivanje tog mjernog područja. Idejno je bilo zamišljeno ostvarivanje mjernog područja od 0 do 30mbar, međutim pošto samo zvono posjeduje i svoju težinu bilo je očito da mjerno područje neće biti moguće ostvariti s početkom od 0mbar sa danim tlačnim mehanizmom uslijed stlačivanja zraka unutar cilindra samom težinom zvona. Kako je i prije navedeno, pretpostavljeni pretlak u zvonu uslijed samo njegove vlastite težine iznosio je $p_{pr} = 486.58 \text{ Pa}$, odnosno ukupni pretlak u zvonastom cilindru se unaprijed pretpostavio na $p_{uk} = 1.01786 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ sa porastom razine vode u cilindru od 1,19mm. Optimalna količina vode za ostvarivanje maksimalnog mjernog područja unaprijed se pretpostavila u iznosu od dvije litre.

Zvonasti manometar prvo je napunjen sa pretpostavljene dvije litre vode. Spajanjem zvonastog manometra na PC M etalonski kalibrator sa mjernim područjem do 2.5bar, bez ikakvih nadodanih utega ustanovljen je pretlak u cilindru od 5.6mbar, nešto više od pretpostavljenog. Razlog tome je naknadna promjena dimenzija postolja za uteg zbog tehnoloških zahtjeva same izrade dijela koji je rezultirao i povećanom masom same konstrukcije.



Slika 10.1. PC M Kalibrator (Z-01196)



Slika 10.2. Određivanje minimalne točke mjernog područja zvonastog manometra



Slika 10.3. Pretlak u zvonastom manometru uslijed njegove težine

Postupak je ponavljen 5 puta te je ustanovljena oscilacija rezultata u iznosu od ± 0.1 mbar. Treba uzeti u obzir da je zvono konstantno pod utjecajem temperature okoliša i okolnim vibracijama koje lako mogu biti uzrok navedenoj oscilaciji.

Postupnim dodavanjem utega dosegao se maksimalni pretlak zvonu u iznosu od 24.2 mbar. Korišteni utezi pod rednim brojevima 2, 5, 9, 10. i 11 [5] posjedovali su ukupnu težinu u iznosu od 6614,078 g.



Slika 10.4. Određivanje maksimalne točke mjernog područja zvonastog manometra



Slika 10.5. Maksimalni postignut pretlak u zvonastom manometru

Postupak je također ponovljen 5 puta je je ustanovljena oscilacija očitanih rezultata u iznosu od ± 0.1 mbar.

Nadodavanjem vode u manometar ustanovljeno je smanjenje maksimalnog postizivog pretlaka u zvonu jer bi došlo do prelijevanja vode preko ruba vanjske posude zvonastog manometra. Smanjivanjem količine vode također je ustanovljeno smanjenje maksimalnog postizivog pretlaka u zvonu jer bi unutarnja posuda dotakla dno vanjske posude prije nego što bi se postigao eventualni veći pretlak od slučaja sa dvije litre vode.

Ovim eksperimentom utvrđeno je mjerno područje zvonastog manometra od 5.6 do 24 mbar.

10.2 Ispitivanje stabilnosti radnih točaka zvonastog manometra

Nakon utvrđenog mjernog područja zvonastog manometra bilo je potrebno ispitati stabilnost generiranja tlaka te točnost ponavljanja manometra.

Ispitivalo se generiranje struje na preciznom pretvorniku tlaka uslijed dodavanja utega na zvonasti manometar. Ispitivanje se provelo u dva seta sa po 6 mjernih točaka u svakom setu. Vrijednosti su se zabilježile te su potom prenesene u računalni program Matlab gdje je kreiran grafički prikaz rezultata.

Od opreme se koristio GE Druck LPX 9381 precizni pretvornik tlaka za generiranje struje, Keithley 2010 multimeter za prikaz rezultata te standardni ampermetar.

10.3 Korištena oprema:



Slika 10.6. Keithley 2010 multimetar



Slika 10.7. GE Druck LPX 9381 precizni pretvornik tlaka

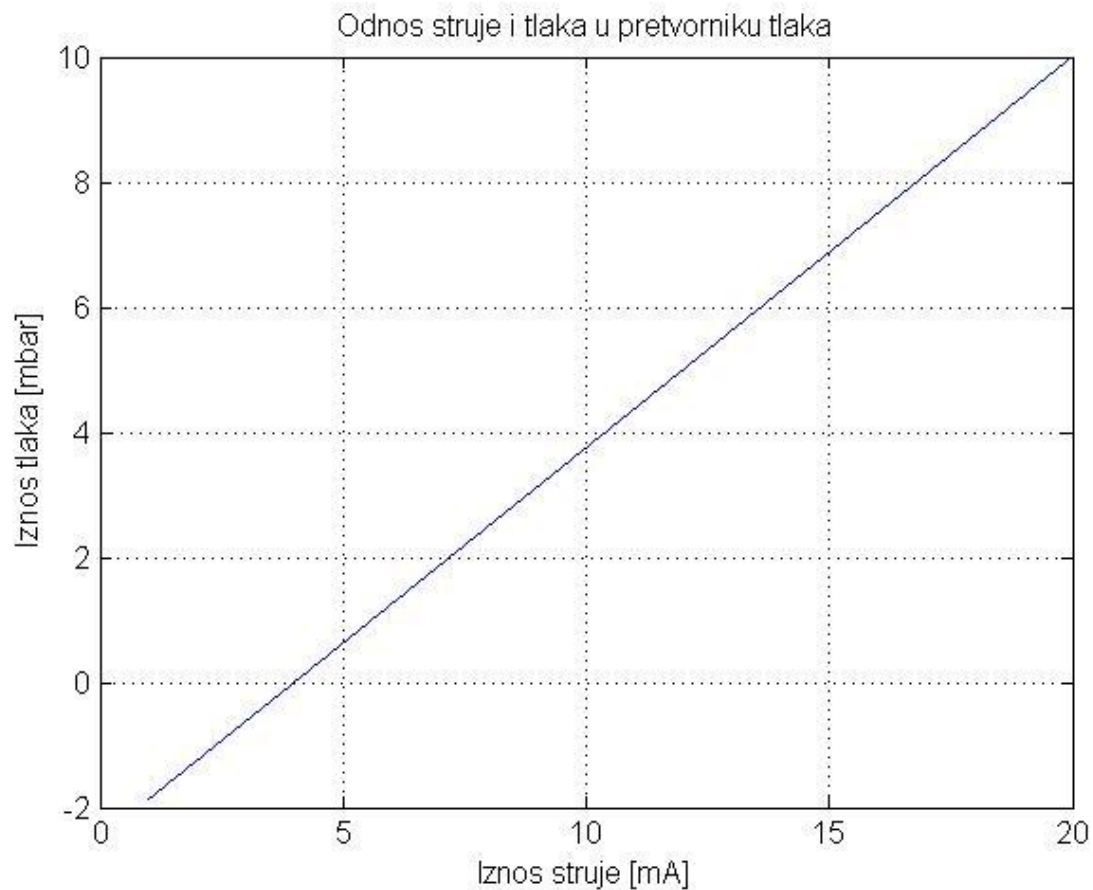


Slika 10.8. Ampermetar/Voltmetar



Slika 10.9. Ispitivanje stabilnosti radnih točaka zvonastog manometra

U programu Matlab kreiran je grafički prikaz linearnog odnosa između generirane struje i mjerenog tlaka prema slici :



Dijagram 10.1. Odnos struje i tlaka u pretvorniku tlaka

Sa unesenim očitanim vrijednostima struje sa multimetra dobili smo šest točaka na pravcu koje nam daju odgovarajuće vrijednosti tlaka za zadanu postavljenu težinu utega prema napisanom kodu u računalnom programu Matlab:

```
13.09.12. 22:16 MATLAB Command Window 1 of 1

>> % Izmjerena struja
>> x

x =

    12.5700    14.3800    16.2300    17.1500    17.4000    17.6900

>> x1

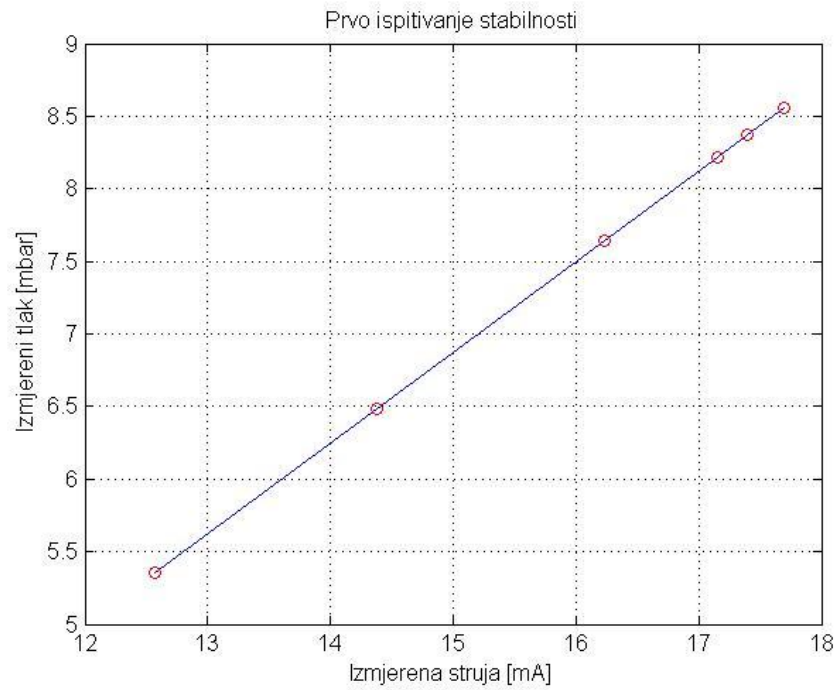
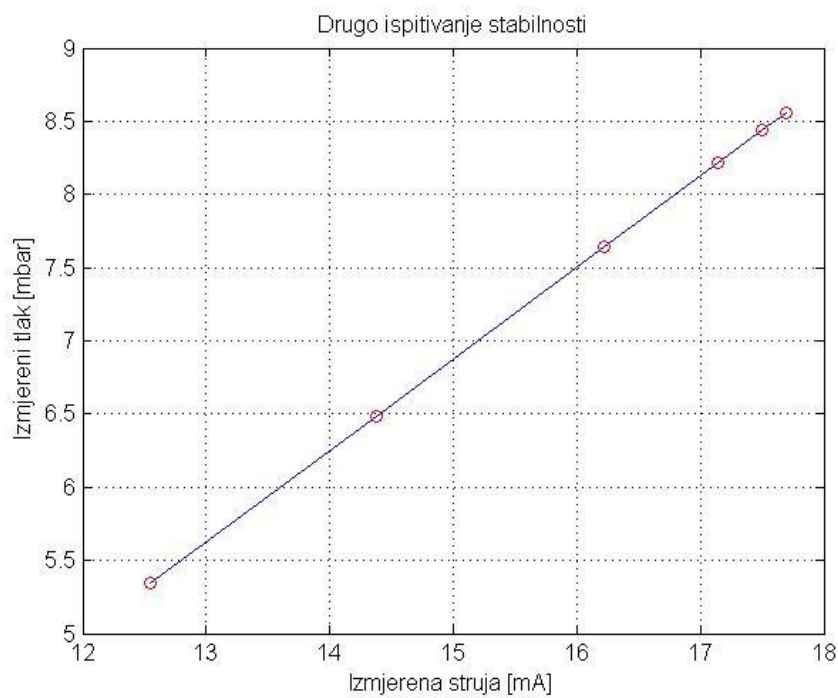
x1 =

    12.5500    14.3800    16.2200    17.1400    17.5000    17.6900

>> % Proračun tlaka prema izmjerenoj struji
>> [a, b] = size(x);
>> [p, q] = size(x1);
>> tlak_1 = zeros(a, b);
>> tlak_2 = zeros(p, q);
>> for i = 1:1:b
    tlak_1(1, i) = 10*x(i)/16-40/16;
end
>> for i = 1:1:q
    tlak_2(1, i) = 10*x1(i)/16-40/16;
end
>> % Iscrtaavanje grafova
>> figure(1)
>> plot(x, tlak_1), grid on, hold on
>> scatter(x, tlak_1, 'r')
>> title('Prvo ispitivanje stabilnosti')
>> xlabel('Izmjerena struja [mA]')
>> ylabel('Izmjereni tlak [mbar]')
>> figure(2)
>> plot(x1, tlak_2), grid on, hold on
>> scatter(x1, tlak_2, 'r')
>> title('Drugo ispitivanje stabilnosti')
>> xlabel('Izmjerena struja [mA]')
>> ylabel('Izmjereni tlak [mbar]')
>>
```

Slika 10.10. Računalni kod u programu Matlab

Iz slike su jasno vidljive očitane vrijednosti struje na multimetru, odnosno unesene vrijednosti na apscisi x. Potom su kreirani grafički prikazi odnosa između struje i tlaka za dva seta ponavljanja.

**Dijagram 10.2. Prvo ispitivanje stabilnosti****Dijagram 10.3. Drugo ispitivanje stabilnosti**

Usporedbom dvaju rezultata utvrdili smo oscilacije u iznosima od $\pm 0.005\text{mA}$ za opterećenja bez utega, te oscilacije u iznosu od otprilike $\pm 0.01\text{mA}$ za opterećenja sa nadodanim utezima.

Također ponovno treba uzeti u obzir osjetljivost rezultata mjerenja na utjecaj vanjske okoline po pitanju temperature i vibracija.

11. Zaključak

Prema dobivenim rezultatima iz određivanja karakteristika zvonastog manometra možemo zaključiti da mjerno područje dovoljno dobro zadovoljava na unaprijed nametnute zahtjeve te da su stabilnost tlaka i točnost ponavljanja manometra u prihvatljivim tolerancijama. Iz toga proizlazi da će zvono biti moguće koristiti u edukacijske svrhe na vježbama na fakultetu strojarstva i brodogradnje kao primjer jednostavnog, lako shvatljivog a opet vrlo konkretnog i dovoljno preciznog rješenja za generiranje malih tlakova velike stabilnosti.

Konstrukcija i razvoj zvonastog manometra je glatko tekla od početne ideje pa sve do realizacije finalnog proizvoda, te su sve prvotne pretpostavke te unaprijed pretpostavljene veličine dovoljno blizu odgovarale stvarnim postignutim veličinama i rezultatima mjerenja. Iz svega prethodno predloženog je jasno vidljiva važnost postepenog, razrađenog planiranja u kojemu na neke stvari ipak treba gledati i razrađivati paralelno kako bismo stvorili što kvalitetniji, trajniji i jeftiniji proizvod. Na kraju krajeva to i jest cijeli inženjerski načini razmišljanja kojemu je ipak krajnji cilj stvaranje nečega novoga, boljega, reprezentativnoga a za što je uz znanje i iskustvo naravno potrebno i puno mašte. Ovaj rad može, ako ništa, poslužiti drugim studentima kao uvid u planiranje i razvoj od početne ideje do finalnog smislenog proizvoda. To je na kraju i bila poanta ovoga rada.

12.Literatura:

- [1] Žanetić, R., Stipišić, R.: *Mjerni pretvornici u procesnoj industriji*
- [3] DKD-R 6-1: *Calibration of Pressure Gauges*, 2003.
- [2] Euramet Cg-17: *Upute za umjeravanje elektromehaničkih manometara*, 2007.
- [4] *Zavarivanje TIG postupkom*, http://hr.wikipedia.org/wiki/Zavarivanje_TIG_postupkom
- [5] Ban, Ž., Matuško, J., Petrović, I.: *Primjena programskog sustava Matlab za rješavanje tehničkih problema*
- [6] Howarth, P., Redgrave, F.: *Mjeriteljstvo ukratko*, 2010.
- [7] *Pressure, barometers and barometric pressure*, <http://www.challengers101.com/Pressure.html>
- [8] Feuerbach, V.: *Osnovna toplinska mjerenja*, 1973.
- [9] Šavar, M.: *Zbirka riješenih zadataka iz mehanike fluida*, 2002.